تأثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر فرآیند احتراق با استفاده از شاخص همگنی در یک موتور اشتعال تراکمی*

مقاله کوتاه

آرش محمدی[۱]   مصطفی ورمزیار[۲]   محسن سلیمانی[۳]

چکیده *تحقیقات گذشته نشان داده که افزودن نانوذرهٔ آلومینا به سوخت باعث کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق می‌شود. در مطالعهٔ حاضر بررسی عددی افزودن نانو ذرات آلومینا به سوخت دیزل و اثر آن بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی یک موتور اشتعال تراکمی پاشش مستقیم، انجام شده است. شبیه‌سازی فرآیندهای پاشش، تشکیل مخلوط و احتراق موتور توسط نرم‌افزار AVL_Fire انجام شده است. در این مطالعه، به‌منظور محاسبهٔ عددی میزان کیفیت اختلاط سوخت و هوا از یک پارامتر اصلاح‌شده با نام شاخص همگنی استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، با افزودن نانو ذرات آلومینا به سوخت، میزان بیشینه فشار و دمای داخل سیلندر به ترتیب ۵/۲ و ۶/۷ درصد و آلاینده‌های آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن و دوده به ترتیب ۲۴ و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مقدار آلاینده مونوکسید کربن ۱۹ درصد افزایش پیدا کرده است. درنهایت نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت، باعث افزایش ۵۲ درصدی شاخص همگنی می‌شود.*

کلیدواژه‌ها موتور اشتعال تراکمی، نانوذرات اکسید آلومینا، شاخص همگنی، آلایندگی.

Influence of Alumina Nanoparticles on the Combustion Process with using Homogeneity Factor in a Compression Ignition Engine

A. mohammadi   M. Varmazyar   M. Soleymani

Abstract *Previous research showed adding Alumina nanoparticles to fuel causes to reduce emissions product of combustion. In this research, addition of alumina nanoparticles to Diesel fuel and effect of it on performance and exhaust emissions of a CI engine has been conducted. Simulation of spray, mixture formation and combustion has been carried out by AVL-Fire software. In this study, in order to calculate the quantity of quality the mixing of fuel and air, a modified parameter called the homogeneity factor, was used. According to the results obtained in this study, by adding Alumina nano-particles to fuel, increase maximum in-cylinder pressure and temperature 5.2 and 6.7 percent respectively and reduces NOx and soot 24 and 25 percent, respectively. Also CO increases 19 percent. Finally, results indicate that the addition of alumina nanoparticles to fuel causes to increase homogeneity factor 52 percent.*

Keywords Compression Ignition engine, Alumina Nanoparticles, Homogeneity factor, Pollutant

*تاریخ دریافت مقاله ۹۸/٤/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۷/۱۲ می‌باشد.

DOI: 10.22067/fum-mech.v31i2.82063

Email: amohammadi@sru.ac.ir

(۱) نویسندهٔ مسئول : استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران

(۲) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران

(۳) کارشناس ارشد، دانشگاه شهید رجایی، تهران

مقدّمه

در طی دهه‌های اخیر و با توجّه به پیشرفت‌های مختلفی که در زمینهٔ خودروسازی حاصل شده، عوامل تعیین‌کنندهٔ جدیدی نیز در نظر گرفته شده که مراحل طراحی و تولید موتورها را تحت تأثیر قرار داده است. اولین عامل میزان سوخت مصرفی و دومین عامل کاهش میزان آلاینده‌های تولیدشده توسط موتور است. میزان آلاینده‌های تولیدی موتور با وضع استانداردها که می‌توان به استانداردهای آلایندگی اروپایی اشاره کرد، کاهش می‌یابد. موتورهای اشتعال تراکمی پاشش مستقیم پرسرعت به دلایل زیادی از قبیل بازده گرمایی بالا، دوام، توان تولیدی، مصرف سوخت کمتر و همچنین میزان بسیار کم آلایندگی‌های خروجی نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای، بسیار مورد توجّه قرار گرفته‌اند [1]. موتورهای اشتعال تراکمی به دلیل احتراق خود به خودی، آلایندهٔ دوده و ناکس بالاتری نسبت به موتورهای اشتعال جرقه‌ای تولید می‌کنند که به‌عنوان دو عامل نگران‌کننده در استفاده ازاین‌گونه موتورها به شمار می‌روند. به دلیل وجود رابطهٔ پیچیده میان تشکیل دو آلایندهٔ دوده و اکسیدهای نیتروژن، کنترل و کاهش هم‌زمان هر دو آلاینده فرآیندی دشوار و پیچیده است [2]. با توجّه به اهمّیّت فرآیند احتراق سوخت و همچنین تولید آلاینده‌ها در موتور احتراق داخلی، مدل کردن فرآیند احتراق پراهمّیّت است. محاسبهٔ سرعت جریان چرخشی، انرژی آزادشده، غلظت گونه‌های واکنش و پخش شعله در فرآیند احتراق، در بررسی و تحلیل احتراق و بهبود آن مهم است. بر همین اساس شبیه‌سازی عددی جریان در بهبود شرایط کارکرد بسیار مفید و پرکاربرد است.

در سال‌های اخیر، علاقه‌مندی به استفاده از سوخت‌های جایگزین و تجدید پذیر و همچنین افزودنی‌های مناسب که سبب بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌ها گردند، افزایش یافته است. در زمینهٔ موتورهای دیزل نیز، مطالعاتی جهت استفاده از هیدروژن، بیو دیزل، الکل و متانول صورت پذیرفته است. همچنین تحقیقات زیادی به‌منظور بررسی شرایط فرآیند احتراق این سوخت‌ها و افزودنی‌ها، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [3]. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که استفاده از امولسیون آب و نفت، آثار مثبتی بر احتراق سوخت‌های مایع بر جای می‌گذارد. بالستر [4] در سال ۱۹۹٦ دریافت که استفاده از امولسیون آب و نفت، در احتراق نفت‌های سنگین، یک روش مؤثر جهت کاهش ذرات معلق خروجی است. گانرمن [5] نیز در سال ۱۹۹۷، اثر افزودن امولسیون به سوخت موتور دیزل را در کاهش آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن و دوده مورد مطالعه قرار داده بود. والاوالکار [6] در سال ۲۰۰۰ نشان داد که با افزایش میزان آب در امولسیون آب و سوخت دیزل، زمان احتراق و میزان سوخت پسماند کاهش می‌یابد. میمانی و پاتیل [7] در سال ۲۰۰۱ نشان دادند که می‌توان اکسید فلزات را به امولسیون آب و دیزل اضافه نمود که در این صورت نقش کاتالیزور را در فعّال کردن پیوندهای مولکولی مخلوط آب-دیزل و نیز انجام یک واکنش شیمیایی ایفا می‌کنند. بررسی‌های صورت گرفته توسط کائو و همکاران [8] در سال ۲۰۰۳، نشان داد که نانو ذرات فلزی پرانرژی (با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر)، دارای ویژگی‌های احتراق مطلوب مانند تولید حرارت بالای احتراق و سرعت پخش شعله است. اضافه نمودن نانو ذرات فلز، کاهش تأخیر در اشتعال، افزایش انرژی حرارتی آزادشده و نیز نرخ بالای فرآیند احتراق را به همراه خواهد داشت. تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر، بیانگر تأثیرات مثبت ناشی از اضافه نمودن نانو ذرات به سوخت‌های مایع و نیز تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیبات آن‌ها بوده است. مطالعات پیشین [11-9]، نشان داده افزایش هدایت حرارتی سوخت ناشی از نانو ذرات است و افزایش هدایت حرارتی در نانو سیّال‌ها ناشی از حرکت براونی نانوذرات است. جانگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ [12] نشان دادند که اضافه کردن نانوذرّهٔ سریم به سوخت دیزل، دمای احتراق را کاهش و نرخ اکسید شدن را افزایش می‌دهد. همچنین بررسی‌های صورت گرفته در

سال ۲۰۰٦ توسط کریشنامورتی [13] نشان داد که به‌کارگیری نانو ذرات می‌توانند به تبخیر سوخت و تشکیل مخلوط آن با هوا کمک نمایند. علاوه بر این، تحقیقات انجام شده در بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ نیز نشان داد که به علّت هدایت حرارتی بالا و انتقال گرما، علاقهٔ زیادی به پژوهش در زمینهٔ نانوسیّالات در میان پژوهشگران وجود دارد. نتایج بررسی مشخص کرد که خواص تابشی نانوسیّالات می‌تواند بسیار متفاوت از سیّال پایه باشد و این ذرات می‌توانند باعث افزایش انتقال حرارت تابشی در زمان احتراق شوند [14,15]. کائو و جونگ در سال ۲۰۰۷ [16] نشان دادند که نانو ذرات آلومینیوم از واکنش‌پذیری بالایی برخوردارند و می‌تواند در دماهای بالا (٤۰۰ الی ٦۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد) با آب واکنش داده و اکسیژن آزاد کند و بدین ترتیب، مصرف سوخت را کاهش دهند. تیاگی و هیانشو [18] در سال ۲۰۰۸ نیز تأثیر اضافه نمودن نانو ذرات بر روی احتراق را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نانو ذرات آلومینیوم وآلومینا به سوخت دیزل اضافه کردند. نانو ذرات در کسرهای حجمی ۰٪، ۰,۱٪ و ۰,۵٪ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه نمودن نانوذرات آلومینیوم به سوخت دیزل، نقاط داغ درون محفظه را افزایش داده و امکان ایجاد اشتعال از چند نقطه را فراهم می‌کند. همچنین بر طبق این تحقیق، نانو ذرات فلز در مجاورت سوخت دیزل، احتمال اشتعال را افزایش می‌دهند و این تأثیر با افزایش دما نیز تشدید خواهد شد. به‌گونه‌ای که اضافه نمودن ۰,۵ درصد آلومینا به سوخت دیزل، می‌تواند احتمال اشتعال را به میزان ٤٥ درصد افزایش دهد. به‌طورکلّی، این تحقیق نشان داد که اضافه نمودن نانو ذرات فلزی، به دلیل تسریع نرخ انتقال حرارت می‌تواند سبب کاهش زمان تأخیر در اشتعال شده و متعاقب با آن تأثیر مثبتی بر روی فرآیند احتراق موتور دیزل خواهد داشت. در سال ۲۰۰۸ لین و همکاران [19] تأثیر افزودن نانو ذرات آلومینیوم به سوخت دیزل را بر روی عملکرد یک موتور دیزل تک سیلندر بررسی کردند. با استناد به این نتایج، آزمایش‌ها بر روی یک موتور تک سیلندر صورت گرفت. قطر نانو ذرات آلومینیوم مورد استفاده، بین ٤۰ تا ٦۰ نانومتر بود. نتایج این مطالعه بیان‌گر این بود که برای سرعت‌های کمتر از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه مصرف سوخت ویژه ترمزی، دوده و نیز غلظت اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۹، آزمایش‌هایی توسط سلوان و همکاران [20] بر روی یک موتور چهارزمانه تک سیلندر دیزل انجام شد. نتایج این تحقیق نشان‌دهندهٔ این بود که اضافه نمودن اکسید سریم به سوخت دیزل، تأثیر به‌سزایی بر افزایش عملکرد و کاهش آلایندگی خواهد داشت. همچنین بر اساس این نتایج، نانوذرات اکسید سریم سبب کاهش تأخیر در اشتعال و افزایش فشار درون محفظهٔ احتراق خواهد شد، به‌گونه‌ای که بیشینهٔ فشار درون محفظهٔ احتراق برای حالت دیزل خالص حدود ۸.٤ مگا پاسکال و برای حالت دیزل حاوی نانوذرات اکسید سریم ۱۰.۲ مگا پاسکال است. در سال ۲۰۱۰ تحقیقاتی با موضوع افزودن نانوذرات اکسید سریم به سوخت دیزل در یک موتور دیزل توسط پترسون و همکاران [21] صورت گرفت. نتایج گویای تأثیرات مثبت نانوذرات اکسید سریم بر عملکرد موتور دیزل، خواص سوخت و نیز کاهش آلایندگی بود. بر طبق این مطالعات، اضافه نمودن اکسید سریم به سوخت، موجب کاهش گازهای آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته خواهد شد. در سال ۲۰۱٤ مهرگان و مقیمان [22] تعیین تأثیر نانوذرات آلومینیوم بر مشخصات احتراق و انتشار آلاینده‌های سوخت‌های مایع از طریق مطالعه عددی را بررسی نمودند. نتیجهٔ مطالعهٔ یادشده این بود که افزودن نانوذرات آلومینیوم منجر به کاهش درجهٔ حرارت شعله سوخت‌های اتانول و دکان می‌شود. علاوه بر این، کسر جرمی آلاینده‌ها از جمله اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. درمجموع افزودن نانوذرات مذکور باعث بهبود ویژگی‌های احتراق می‌شود. در سال ۲۰۱٥ مینگزیا [23] تحقیقاتی با موضوع بررسی اثر اندازه ذرات بر روی واکنش و مشخصات احتراق نانو ذرات آلومینیوم انجام گرفت. نتیجهٔ این مطالعه این بود که واکنش نانوذرات،

زمانی که اندازهٔ این ذرات از ۱۱۰ نانومتر به ۶۰ نانومتر کاهش می‌یابد، افزایش می‌یابد.

در این مطالعه، تمرکز بر روی مطالعهٔ عددی تأثیرات استفاده از نانو ذرات جهت بررسی تشکیل آلاینده‌های خروجی موتور و عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی قرار گرفته است. به همین منظور، یک پارامتر با نام شاخص همگنی (Homogeneity Factor) که سطح کیفی ترکیب سوخت و هوا را بررسی می‌کند، در این مطالعه استفاده شده است تا ابزاری سودمند جهت بررسی تشکیل مخلوط، فرآیند احتراق و همچنین تشکیل آلاینده‌ها و درنهایت عملکرد موتور با استفاده از این پارامتر باشد.

معادلات حاکم و الگوهای به‌کاررفته در شبیه‌سازی

معادلات حاکم بر شبیه‌سازی حاضر، شامل معادلهٔ پیوستگی جرم، معادلهٔ مومنتوم و معادلهٔ انرژی درون محفظهٔ احتراق در کنار معادلات اغتشاش و همچنین معادلات مربوط به فرآیند پاشش و احتراق و شاخص همگنی است. مدل پاشش و تبخیر سوخت و همچنین احتراق و مدل‌سازی افزودن نانوذرهٔ آلومینا به سوخت دیزل آورده شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب معادله‌های ۱ تا ۳ است:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \qquad (۲)$$

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (۳)$$

مدل فرآیند احتراق. تعیین مقدار متوسط نرخ واکنش‌های شیمیایی اشتعال، مسألهٔ مهمی در شبیه‌سازی عددی فرآیندهای سینتیک شیمیایی است زیرا در این فرآیندها توابع غیر خطی بسیاری برای تعین مقادیر محلی دما و تراکم گونه‌ها وجود دارد. در مطالعهٔ حاضر از الگوی شعلهٔ پیوسته (Coherent flame model) استفاده شده است [24]. این الگوی اشتعالی بر مبنای نظریّهٔ ریزشعله استوار است و بیان می‌کند که شعلهٔ متلاطم متشکل از مجموعه‌ای از ریزشعله‌های آرام است. مقیاس‌های زمان و طول در ناحیهٔ واکنش، کمتر از مقیاس‌های طول و زمان تلاطمی شعله در حال انتشار فرض شده‌اند. یکی از ابزارهای محاسباتی قدرتمند این الگوی اشتعالی، الگوی اشتعال پیوستهٔ گسترش یافته سه ناحیه‌ای (ECFM-3Z) است که در مطالعهٔ حاضر از این الگو بهره برده شده است [25]. این الگوی احتراقی بر مبنای معادلات انتقال چگالی سطح شعله و الگوی اختلاط است که می‌تواند برای احتراق نفوذی (Diffusion combustion) و مخلوط پیش‌آمیختهٔ ناهمگن بکار گرفته شود. الگوی اشتعال پیوستهٔ گسترش‌یافتهٔ سه ناحیه‌ای، سه ناحیهٔ اشتعالی را معرفی می‌کند که عبارت‌اند از ناحیهٔ خود اشتعالی، ناحیهٔ اشتعال پیش‌آمیخته و ناحیهٔ اشتعال پیش‌نیامیخته شده که این

الگوی تکامل یافته، این سه ناحیهٔ اشتعال را از یکدیگر تمیز می‌دهد [26].

$$\overline{\rho \dot{r}_{fu}} = \frac{C_{fu}}{\tau_R}\bar{\rho}\min\left(\bar{y}_{fu}, \frac{\bar{y}_{ox}}{S}, \frac{C_{Pr}.\bar{y}_{Pr}}{1+S}\right) \qquad (٤)$$

دو عبارت اوّل راست رابطهٔ (٤)، مربوط به دسترس‌پذیری سوخت و اکسیژن و ترم سوم احتمال انجام واکنش بوده و بیان‌کنندهٔ این است که پخش شعله در غیاب محصولات دمابالا امکان‌پذیر نیست. مقدار کمینه، مربوط به حضور نسبت هوا و سوخت معیّن برای احتراق است. ثابت‌های C_{Pr} و C_{fu} در مدل بالا ثابت‌های تجربی مربوط به محصولات و سوخت بوده و τ_R نیز مقیاس زمانی برای اختلاط توربولانس واکنش است و به‌صورت رابطهٔ (٥) تعریف می‌شود.

$$\tau_R = \frac{k}{\varepsilon} \qquad (٥)$$

که از لحاظ فیزیکی نرخ مصرف مخلوط قابل احتراق را نشان می‌دهد.

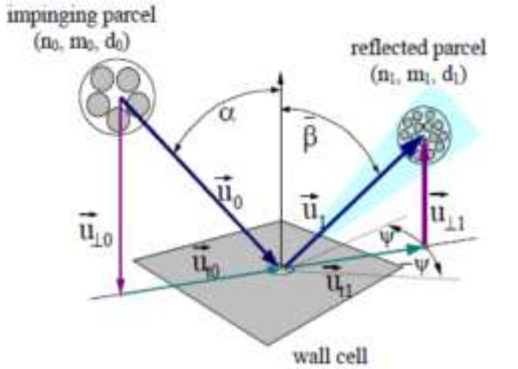
مدل آشفتگی جریان. مرحلهٔ تبخیر و اختلاط و به‌ویژه آهنگ اختلاط سوخت به‌عنوان یک عامل مهم و تعیین‌کننده در موتور اشتعال تراکمی مطرح است و مراحل اولیه اشتعال به‌شدّت تحت تأثیر این فرآیند قرار می‌گیرند. الگوهای اختلاط زیادی وجود دارد که در این مطالعه نرخ مخلوط و واکنش بر حسب مقیاس زمانی آشفتگی $k-\zeta-f$ استفاده شده که توسط هانجلیک و همکاران توسعه داده شده است [27]. این الگو بر اساس اصل وارفتگی بیضوی داربین، بنا شده که برای حل معادلات مورد نظر از آهنگ مقیاس سرعت $\zeta = \frac{\overline{v^2}}{k}$ به‌جای $\overline{v^2}$ بهره گرفته شده است [24] $\overline{v^2}$ یک مقیاس سرعت و k نیز انرژی سینیتیکی اختلاط است. از مزایای استفاده از این الگو می‌توان به اهمیّت آن در ناحیهٔ انژکتور سوخت اشاره کرد که شرایط مرزی در آن بسیار تأثیرگذار است.

مدل تشکیل آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن و دوده. شبیه‌سازی تشکیل آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن معمولاً بر مبنای فرآیند NO گرمایی است و از الگوی گسترش یافته زلدوویچ در این مطالعه استفاده شده است. این الگو بر پایه فرضیّهٔ تعادل شیمیایی استوار است و بیان می‌کند که تنها اتم نیتروژن N به‌عنوان گونهٔ حدّ واسط واکنش شیمیایی این سازوکار در نظر گرفته شده است. فرآیند NO سریع اشاره به گاز N_2 و واکنش آن با CH, CCH_2 که گونه‌های موجود در سوخت می‌باشند، دارد. برای سوخت‌هایی مانند سوخت‌های زیستی که معمولاً با دمای پایین‌تری فرآیند احتراق را سپری می‌کنند، NO سریع می‌تواند علّت اصلی تشکیل آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن باشد [28,29]. تشکیل دوده و نحوهٔ ایجاد آن در طول فرآیند احتراق، تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی بسیاری است که طی یک‌میلیونیوم ثانیه اتّفاق می‌افتد. سازوکار آلایندهٔ دوده به سبب دلایل زیادی از قبیل تعداد زیاد گونه‌های اصلی تشکیل‌دهندهٔ سوخت، سازوکار پیچیدهٔ احتراق و همچنین فعل‌وانفعالات ناهمگن در حین تشکیل این آلاینده، شبیه‌سازی این فرآیند را دشوار نموده است [30]. در پژوهش حاضر جهت بررسی تشکیل آلایندهٔ دوده از الگوی جنبشی (Kinetic model) استفاده شده است.

مدل پراکندگی اغتشاش و تعاملی ذرات. وظیفهٔ اصلی انژکتور، تزریق سوخت با فشار بالا است تا با کاهش شعاع قطرات، فرآیند تبخیر سوخت در زمان کوتاه‌تری انجام شود و درنتیجه طول نفوذ ذرات سوخت در سیلندر افزایش یافته و ترکیب سوخت و هوای بهتری تشکیل شود [31]. زمانی که گام زمانی محاسبات بزرگ‌تر از زمان همبستگی آشفتگی باشد، ذرّهٔ پاشیده‌شده از بیش از یک گرداب آشفتگی می‌گذرد، پس به همین دلیل بیش از یک سرعت نسبی آشفتگی خواهد داشت. در این مطالعه از الگوی O'Rourke برای بررسی و شبیه‌سازی پراکندگی اغتشاش ذرات پاشیده‌شده،

استفاده شده است [32]. در این الگو به‌جای کاهش گام زمانی پاشش، نوسانات ذرات صفر در نظر گرفته می‌شود اما در هر گام زمانی محاسباتی، مکان و سرعت جدید ذرّه محاسبه می‌شود. در برخی از موارد، استفاده از این الگو می‌تواند به کاهش زمان محاسبات پاشش منجر شود [33]. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی برخورد (تعامل) ذرات سوخت، از الگوی Nordin استفاده شده است [33]. بهینه‌شدهٔ الگوی O'Rourke به‌منظور غلبه بر حساسیت شبکه است که در این الگو بر خلاف الگوهای دیگر، نتایج مستقل از تأثیر تعداد سلول‌ها است. طبق الگوی نوردین، برخورد میان دو ذره زمانی اتّفاق می‌افتد که مدارهای آن‌ها از وسط قطع شود و نقطهٔ تقابل دو ذرّه در یک زمان و در مرحلهٔ ادغام پاشش به هم برسند [24].

مدل برخورد ذرات با سطح پیستون. چگونگی برخورد ذرات مایع با سطح پیستون می‌تواند نقش مهم و اساسی در یک موتور اشتعال تراکمی یا اشتعال جرقه‌ای ایفا کند و این مسأله زمانی که موتور مورد نظر دارای سیلندرهایی با قطر کم باشد، بسیار تأثیرگذار خواهد بود زیرا کسر بالایی از ذرات سوخت با سطح برخورد خواهد کرد که هنوز تبخیر نشده است. این موضوع، فرآیند احتراق و درنتیجه آلاینده‌های تشکیل‌شده را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا احتراق ناقص سوخت در ناحیهٔ نزدیک دیوار سیلندر باعث افزایش تشکیل دوده و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. رفتار قطره در هنگام برخورد و پس از برخورد با سطح بستگی به چندین پارامتر مهم از جمله سرعت قطره، شعاع قطره، خصوصیات فیزیکی قطره، زبری سطح دیوار و دمای دیوار دارد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی و بررسی برخورد ذرات به سطح از الگوی Walljet1 استفاده شده است. در الگوی مزبور، قطر ذرات با توجّه به یک تابع از عدد وبر تغییر کرده است که در شکل (۱) نشان داده شده است [25].



شکل (۱): برخورد قطرات با دیواره [25]

مدل تبخیر قطرات پاشش. جهت بررسی و مطالعه بر تبخیر و افزایش دمای قطرات سوخت، از الگوی تبخیر Dukowicz [34] استفاده شده است. محاسبات انتقال حرارت همراه با یک قیاس بین انتقال حرارت و جرم بر اساس توابع نیمه‌تجربی در این الگو صورت پذیرفت. طبق این الگو، دمای قطره سوخت یکنواخت در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، آهنگ تغییر دمای قطرات سوخت با استفاده از معادلهٔ انرژی قطرات تعیین می‌شود که بیان می‌کند انتقال دما از گازهای اطراف به قطره سوخت باعث افزایش دمای آن شده و یا به فرآیند تبخیر آن کمک می‌کند. در این الگو برخلاف الگوهای دیگر نیازی به تعیین توزیع اولیه ذرات خروجی انژکتور نیست. همچنین با در نظر گرفتن الگوی Dispersion stochastic امکان در نظر گرفتن سرعت نوسانی علاوه بر سرعت میانگین ذرات سوخت، تأثیر نیروهای بین ذرات و همچنین گردابه‌های اختلاطی فراهم شده است. همچنین با استفاده از این الگو فرض می‌شود که سرعت نوسانی، دارای توزیع گوس تصادفی است. علاوه بر الگوهای یادشدهٔ بالا، از الگوی دیواره پاشش Spray wall در این شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. در این الگو فرض می‌شود که یک قطره که با سطح برخورد می‌کند طبق عدد وبر، تحت تأثیر برجهندگی یا انعکاس قرار گیرد.

مدل فروپاشی (Break-up length). در این مطالعه از الگوی فروپاشی سوخت Wave [۲۸] جهت بررسی تأثیر

پیکربندی‌های پاشش سوخت بر ساختمان انژکتور موتور اشتعال تراکمی و تأثیرات آن بر تشکیل قطرات اولیه و ثانویهٔ ذرات سوخت تزریق‌شده، استفاده شده است. رشد آشفتگی اولیهٔ سطح سوخت تزریق‌شده، به طول موج و دیگر خصوصیات فیزیکی و دینامیکی آن وابسته است. برای انجام این شبیه‌سازی، با استفاده از این الگوی فروپاشی سوخت، قطر ذرات سوخت هم‌اندازه با قطر سوراخ سامانه انژکتور در نظر گرفته شده است.

شاخص همگنی

کیفیت اختلاط سوخت و هوا در موتورهای اشتعال تراکمی یکی از اساسی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در کنترل اشتعال، احتراق پیش‌آمیخته و احتراق ترکیب کنترل شده است، به‌خصوص برای محاسبهٔ میزان آلاینده‌های خروجی همچون مونواکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته، اکسیدهای نیتروژن و دوده بسیار مهم است. شاخص همگنی راهبردی در زمینهٔ توسعه و پژوهش موتورهای اشتعال تراکمی است تا بتوان به کمک آن کیفیت اختلاط سوخت و هوا را به کمک آن تعیین کرد. برای اولین بار، پنگ و همکاران از پارامتر شاخص همگنی استفاده کردند که از طریق روابط ارائه شده در منابع [35,36]، میزان کیفیت اختلاط سوخت و هوا، بررسی شده است. بدیهی است که افزایش میزان سوخت در یک سلول محاسباتی به دلیل کاهش میزان سوخت موجود در سلول محاسباتی دیگر است. از انحراف استاندارد در تعریف استفاده شده تا موضوع غیر یکنواختی مخلوط، دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد. شاخص همگنی بر اساس روابط موجود برای درجهٔ ناهمگنی تعریف شده است تا یک رابطهٔ مناسب‌تر و دقیق‌تر برای بررسی و مطالعه کیفیت اختلاط سوخت و هوا به دست آید که در این مطالعه از آن بهره گرفته شده است. برای محاسبهٔ ضریب ناهمگنی طبق از رابطهٔ (٦) محاسبه می‌شود [37,38].

$$HeterF(\theta) = \frac{\sum_{i=0}^{Ncells} \frac{\sqrt{(\varphi_i - \varphi_o)^2}}{AFR_{st} + \varphi_i} \delta m_i}{2\varphi_o M}$$

$$\varphi_0 = \frac{\sum_{i=0}^{Ncells} \varphi_i \delta m_i}{M}$$

(٦)

در این رابطه φ_0 نسبت تعادلی میانگین لحظه‌ای داخل سیلندر، AFR_{st} نسبت سوخت به هوای استوکیومتری داخل سیلندر، φ_i نسبت ت دلی سوخت در سلول i–ام، δm_i جرم سوخت در سلول i–ام و M جرم کل سوخت لحظه‌ای در داخل سیلندر است.
ضریب ناهمگنی به پخش سوخت و هوای داخل سیلندر یک عدد بین صفر و یک نسبت می‌دهد. برای محاسبهٔ شاخص همگنی از رابطهٔ (٧) استفاده خواهیم کرد [37,38].

$$HF(\theta) = \left(1 - HeterF(\theta)\right)\% \qquad (٧)$$

ضریب همگنی عددی بین صفر و یک است که درواقع یک عدد به پخش سوخت و هوای داخل سیلندر نسبت می‌دهد و هرچه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، درواقع تشکیل مخلوط بهتری داریم.

خواص مخلوط نانوذرّه و سوخت دیزل

چهار خاصیت ترموفیزیکی سیّال وجود دارد که با افزودن نانوذرات به سیّال پایه، مقدارشان تغییر می‌کند. این خواص عبارت‌اند از چگالی، لزجت سیال، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه است. محقّقان مختلف نظرات متفاوتی در مورد اثر افزودن نانوذرات بر روی مقادیر این خواص بیان کرده‌اند اما به‌طورکلّی افزودن نانوذرات باعث تغییر این خواص می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی

برای محاسبهٔ ضریب هدایت حرارتی مخلوط سوخت و نانوذرّهٔ آلومینا از مدل براگمن استفاده شده است که برای نانو ذرات با شکل کروی کاربرد دارد [39].

$$\frac{k_{nf}}{k}=\frac{1}{4}[(3\varphi-1)k_s+(2-3\varphi)k]+\frac{k}{4}\sqrt{\Delta} \qquad (۸)$$

$$\Delta=\left[(3\varphi-1)^2\left(\frac{k_s}{k}\right)^2+(2-3\varphi)^2+2(2+9\varphi-9\varphi^2)\left(\frac{k_s}{k}\right)\right] \qquad (۹)$$

در معادلهٔ (۸) k_{nf} ، k ، k_s ، φ به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانوسیّال، ضریب هدایت حرارتی سیّال پایه، ضریب هدایت حرارتی جامد و کسر حجمی نانوذرات هستند.

ضریب لزجت

برای محاسبهٔ ضریب لزجت مخلوط سوخت و نانوذرّهٔ آلومینا از رابطهٔ لیو جهت استفاده شده است [٤١].

$$\mu_{nf}=\mu_{bf}(108.2\varphi^2+5.45\varphi+1) \qquad (۱۰)$$

گرمای ویژه

برای محاسبهٔ گرمای ویژهٔ مخلوط سوخت و نانوذرّهٔ آلومینیم از رابطهٔ پاک و چو استفاده شده است [40].

$$c_p=(1-\varphi)c_{p,bf}+\varphi c_{p,np} \qquad (۱۱)$$

که در رابطهٔ (۱۱) $c_{p,bf}$، $c_{p,np}$ و φ به ترتیب ظرفیت گرمایی سیّال پایه، ظرفیت گرمایی نانوذرّه و کسر حجمی مخلوط است.

چگالی

برای محاسبهٔ چگالی مخلوط سوخت و نانوذرّهٔ آلومینا از رابطهٔ پاک و چو استفاده شده است [٤١].

$$\rho_{nf}=(1-\varphi)\rho_{bf}+\varphi\rho_s \qquad (۱۲)$$

که در رابطهٔ (۱۲) ρ_{bf}، ρ_s، φ به ترتیب چگالی سیّال پایه، چگالی نانو ذرات و کسر حجمی مخلوط هستند.

ارزش حرارتی

ارزش حرارتی سوخت بر اساس استاندارد محفظهٔ حجم ثابت به‌صورت جدول (۱) است.

شبکهٔ محاسباتی و استقلال از شبکه

مطالعهٔ عددی مورد نظر جهت انجام پژوهش حاضر، بر روی موتور دیزل سواری چهارزمانه پاشش مستقیم است. مشخصات فنّی موتور دیزل در جدول (۲) آورده شده است. با توجّه به زمان‌بر بودن شبیه‌سازی در سیکل بسته (شامل باز و بسته شدن سوپاپ‌ها)، شبیه‌سازی در سیکل بسته (زمان بسته شدن سوپاپ هوا تا باز شدن سوپاپ دود) انجام شده است. شرایط اولیهٔ حل در زمان بسته شدن سوپاپ هوا که شبیه‌سازی از آنجا شروع شده است با توجّه به شرایط کارکرد موتور، در جدول (۳) آورده شده است. در مطالعهٔ حاضر، شبکهٔ محاسباتی برای انجام پژوهش حاضر توسط نرم‌افزار دینامیک سیّالات محاسباتی AVL_ESE ایجاد شده است. به دلیل موقعیت هندسی متقارن سامانه پاشش سوخت و قرارگیری آن در مرکز سرسیلندر و همچنین به دلیل وجود ۸ سوراخ در نازل پاشش، محاسبات بر روی یک قطاع ٤٥ درجه از کاسه پیستون صورت پذیرفته است.

جدول (۱): ارزش حرارتی سوخت [42]

ردیف	ارزش حرارتی	کیلوژول بر کیلوگرم
١	سوخت دیزل	٤٣٥٠٠
٢	سوخت دیزل با ppm٥٠ نانوذرّه	٤٣٦٣٠
٣	سوخت دیزل با ppm٢٥ نانوذرّه	٤٣٧٨٣

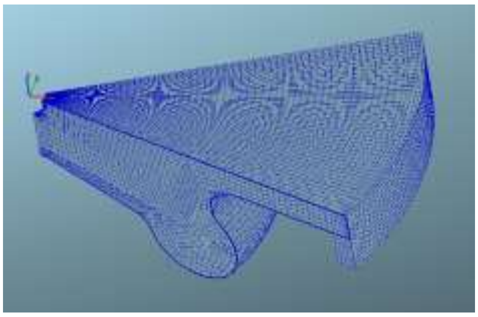
جدول (۲): مشخصات فنّی موتور

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	تعداد سیلندر	٤
۲	قطر سیلندر	۷٦ میلی‌متر
۳	کورس پیستون	۸۲,٥ میلی‌متر
٤	طول شاتون	۱۳٤,۲٥ میلی‌متر
٥	نسبت تراکم	۱٦,٥
٦	فشار پاشش	۱٦۰ بار
۷	بیشینه توان	۹۰ کیلووات

جدول (۳): شرایط اولیه موتور دیزل

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	فشار	۲,۳۷ بار
۲	دما	٤۰٦,۸٥ کلوین
۳	نسبت چرخش	۱,۷
٤	دور موتور	٤۰۰۰ د.د.د
٥	کسر جرمی EGR	۰,۰۸
٦	جرم هوا	۸۰۸,٦۸ میلی‌گرم
۷	زمان پیش پاشش	٥۰,۷۷ درجهٔ قبل از TDC
۸	زمان پاشش اصلی	۱۸,٤٥ درجهٔ قبل از TDC
۹	دمای سوخت	۳۱۳,۱٥ کلوین

شکل محفظهٔ احتراق طراحی شده و شبکه‌های محاسباتی آن برای موقعیتی که پیستون در نقطهٔ مرگ بالا قرار دارد، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است، سطح کاسه پیستون جهت انجام محاسبات انتقال حرارت دقیق‌تر با سه لایهٔ مرزی نزدیک سطح پستون بندی شبکه‌بندی شده است. به‌منظور محاسبه و شبیه‌سازی با دقّت بالاتر فرآیند احتراق، شبیه‌سازی با گام ۰/۵ درجه صورت گرفته است.



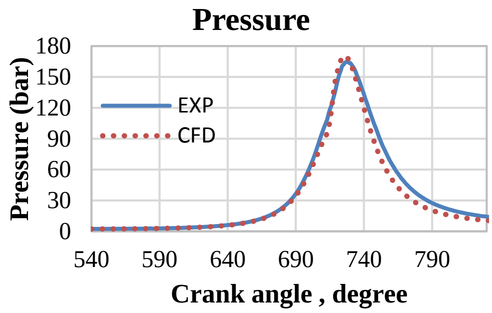
شکل (۲): هندسه و شبکه محاسباتی محفظهٔ احتراق در نقطهٔ مرگ بالا

میانگین اندازهٔ سلول‌ها در شبکهٔ ایجادشده برابر ۰/٦٥ میلی‌متر است. شبکه‌بندی ایجادشده توسط نرم‌افزار برابر ۲۸٦٥۱٥ سلول در نقطهٔ مرگ پایین و ۷٤٤۷٥ سلول در نقطهٔ مرگ بالا است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکهٔ ایجادشده، هندسه مورد نظر با شبکه‌های ۲٤٥۲٥۰، ۳۲۳۷۷٥، ۳٦٤۰۳٥ و ۳۸۰۰۷۰ و ٦۸۲۸۷٥ سلولی نیز شبیه‌سازی شد که حالت ۲۸٦٥۱٥ سلولی نشان داد که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی توزیع فشار، مستقل شبکه است. جهت تمرکز شبیه‌سازی بر جریان سیّال و فرآیند احتراق، محاسبات از زمان بسته شدن درگاه ورودی تا ابتدای زمان باز شدن درگاه خروجی انجام شده است.

بحث و نتایج

شکل شمارهٔ (۳) مقایسهٔ فشار میانگین تجربی و عددی درون محفظهٔ احتراق را با زاویه میل‌لنگ نشان می‌دهد. در حالت پایه کارکرد موتور، فرآیند پیش پاشش در ٦٦۹.۲۳ درجهٔ میل‌لنگ و پاشش اصلی در ۷۰۱.٥٥ درجهٔ میل‌لنگ صورت گرفته است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، روند تغییر فشار درون سیلندر که توسط نرم‌افزار دینامیک سیّال محاسباتی شبیه‌سازی شده است، از تطابق مناسبی با نتایج تجربی برخوردار است. اختلاف اندکی که مابین نتایج حاصل از پژوهش تجربی و مطالعهٔ عددی مشاهده می‌شود، می‌تواند ناشی از عدم قطعیت در مورد اطّلاعات و شرایط اولیهٔ تجربی مانند زاویهٔ مخروط پاشش، دما به هنگام بسته شدن سوپاپ‌های هوا

باشد. بیشینه فشار داخل سیلندر در حالت تجربی ۱٦٣/٥ بار در زاویه ۷۳۰ درجه و در شبیه‌سازی ١٦٨/٦ در زاویهٔ ۷۲۷ درجه است که حدود ۳ درصد خطا دارد.



شکل (۳): مقایسهٔ تغییرات فشار تجربی و عددی درون محفظهٔ احتراق [43]

در جدول (٤) خواص ترموفیزیکی ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه مربوط به ترکیب سوخت و نانوذرّه برای درصدهای حجمی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/٥ آورده شده است.

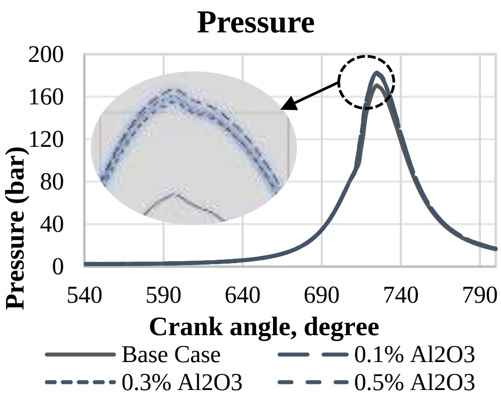
جدول (٤): خواص ترموفیزیکی نانوذرّه

ردیف	ضریب هدایت حرارتی	گرمای ویژه	درصد حجمی نانوذرّهٔ آلومینا
۱	۲۷/۰۱٥	١٩٤٠	۰/۱
۲	۲۱/۰٤٥	۱۷۲۱	۰/۳
۳	١٥/۰۷٥	١٥۰۲	۰/٥

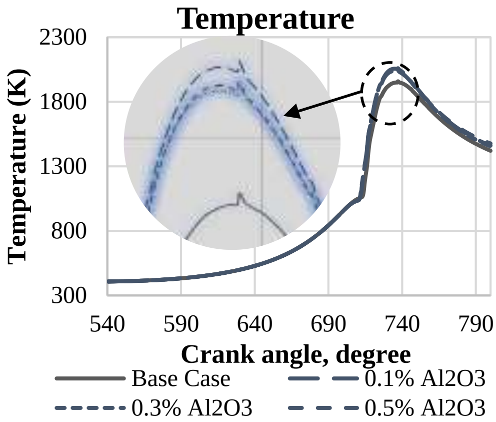
شکل (٤) نشان‌دهندهٔ تغییرات فشار درون محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/٥ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. مطابق شکل (٤) ماکزیمم فشار درون محفظهٔ احتراق در حالت پایه کارکرد موتور ۱٦٨.٦٧٦ بار در زاویه ۷۲٤ درجه است. با افزودن ۰,۱٪ تا ۰/٥ حجمی نانو ذرات آلومینابه سوخت دیزل شاهد افزایش فشار به مقدار ۱۸۲ بار در زاویه ۷۲٤ درجه هستیم که حدود ۷٪ افزایش فشار اتفاق می‌افتد. با افزودن نانو ذرات آلومینا به سوخت به شکست شدن قطرات لایه‌های سوخت secondary atomization [44] با اثرگذاری روی خواص ترموفیزیکی کمک می‌کند و میزان ضریب هدایت حرارتی ضریب هدایت حرارتی سوخت دیزل افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب هدایت حرارتی، نرخ تبخیر سوخت افزایش یافته و ازاین‌رو قطرات سوخت شعاع کمتری خواهند داشت این پدیده به micro-explosion [44] در افزون نانو ذرات به سوخت معروف است.

با افزایش نرخ غلظت بخار سوخت، نرخ احتراق سوخت افزایش می‌یابد که باعث افزایش فشار بیشینه می‌شود. فشار بیشینه از ١٦٨/٦ بار به ۱۸۰ بار می‌رسد. بیشترین ضریب هدایت حرارتی مخلوط دیزل و نانوذرّهٔ مربوط افزودن ۰/۱ درصد (بیشینهٔ فشار ۱۸۲/٦ بار) و کمترین آن با افزودن ۰/٥ درصد (بیشینهٔ فشار ۱۸۱/۲ بار) است ازاین‌رو بیشترین فشار بیشینهٔ داخل سیلندر با افزودن ۰/۱ درصد است.

شکل (٥) نشان‌دهندهٔ تغییرات دمای درون محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/٥ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. با افزودن نانو ذرات آلومینابه سوخت، ماکزیمم درجهٔ حرارت درون محفظهٔ احتراق افزایش می‌یابد. با افزودن نانو ذرات آلومینا به سوخت به شکست شدن قطرات لایه‌های سوخت secondary atomization و micro-explosion [44] کمک است.



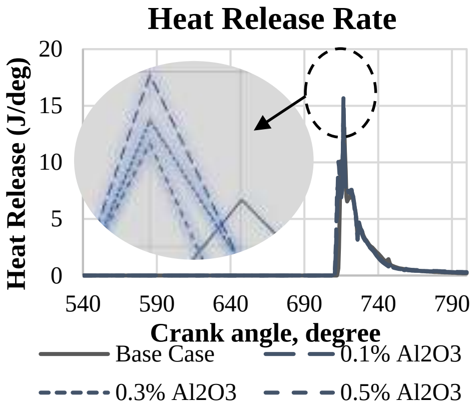
شکل (٤): نمودار تغییرات فشار درون محفظهٔ احتراق



شکل (٥): نمودار تغییرات دما درون محفظهٔ احتراق

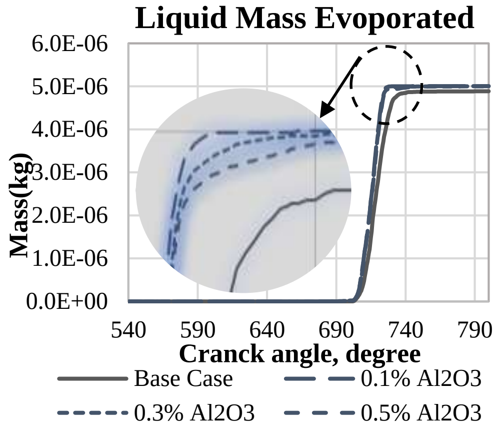
بیشینهٔ درجهٔ حرارت درون محفظهٔ احتراق در حالت پایه کارکرد موتور ١٩٥٧.٦٦ کلوین در زاویهٔ ٧٣٧ درجه است که با افزودن ٠,١٪ نانو ذرات آلومینابه سوخت، بیشینهٔ درجهٔ حرارت درون محفظهٔ احتراق به ٢٠٦٠ کلوین در زاویهٔ ٧٣٧ درجه می‌رسد که حدود ٥٪ افزایش دما را به همراه دارد و با افزودن ٠/٥ درصد (بیشینهٔ دمای ٢٠٤٤ کلوین) است.

شکل (٦) نشان‌دهنده نرخ آزادسازی حرارت درون محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ٠، ٠/١، ٠/٣ و ٠/٥ برای نانوذرّهٔ آلومینا در سوخت دیزل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ آزادسازی حرارت درون محفظهٔ احتراق برای حالت سوخت حاوی نانوذرّهٔ آلومینا بالاتر از حالت پایهٔ کارکرد موتور است که علّت آن افزایش ضریب هدایت حرارتی سوخت و کاهش زمان تبخیر قطرات است و با تسریع فرآیند احتراق، زمان تأخیر در اشتعال را کاهش می‌دهد. نرخ آزادسازی حرارت درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایه کارکرد موتور در سه درجه قبل از نقطهٔ مرگ بالا حدود ١٣.٠٥٥٩ ژول بر درجه در زاویه ٧١٧ درجه است که با افزودن ٠,١٪ نانو ذرات آلومینا به سوخت، میزان نرخ آزادسازی حرارت درون محفظهٔ احتراق به حدود ١٥.٩ ژول بر درجه در زاویهٔ ٧١٦ درجه می‌رسد که حدود ٢٢٪ افزایش می‌یابد.



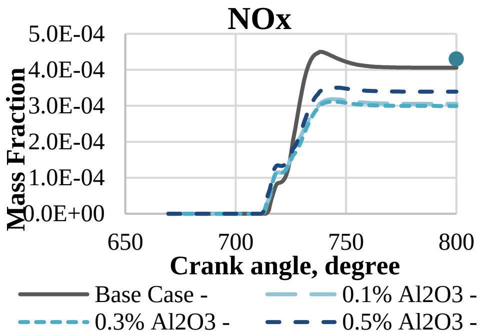
شکل (٦): نمودار نرخ حرارت آزادشده درون محفظهٔ احتراق

شکل (٧) میزان جرم سیّال (سوخت) تبخیر شده بر حسب زاویهٔ میل‌لنگ با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ٠، ٠/١، ٠/٣ و ٠/٥ برای نانوذرّهٔ آلومینا در سوخت دیزل است. میزان سوخت تبخیر شده برای سوخت حاوی نانوذرات آلومینا بالاتر از حالت پایهٔ کارکرد موتور است. به‌طورکلّی، حضور نانوذرات فلز درون محفظهٔ احتراق، باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیّال و ازاین‌رو جذب حرارت بیشتر توسط قطرات سوخت شده و نرخ جرم سوخت تبخیر شده را افزایش می‌دهد. میزان جرم سیّال تبخیر شده درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایه کارکرد موتور حدود ٤/٨٨ میلی‌گرم است که با افزودن ٠,١٪ نانو ذرات آلومینابه سوخت، میزان جرم سیّال تبخیر شده درون محفظهٔ احتراق به ٥ میلی‌گرم می‌رسد که حدود ٢٪ افزایش می‌یابد.



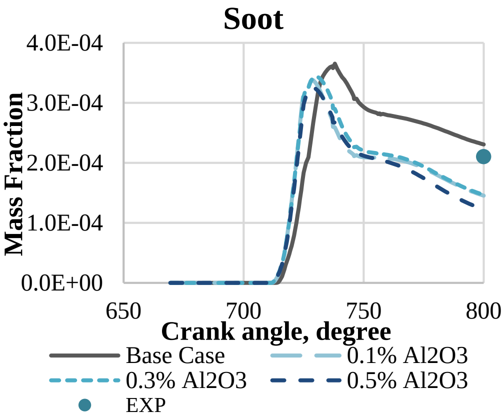
شکل (۷): نمودار جرم سوخت تبخیر شده درون محفظهٔ احتراق

شکل (۸) میزان گازهای آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن درون محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. اکسیدهای نیتروژن هنگامی در یک موتور به وجود می‌آید که دماهای بالای احتراق باعث می‌شود که مقداری از N_2 که در حالت عادی پایدار است، به نیتروژن تک اتمی N تجزیه شود که سپس این نیتروژن تک اتمی با اکسیژن ترکیب می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت تأثیر قابل توجّهی بر تشکیل آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن دارد. میزان آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن تولیدی درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایهٔ کارکرد موتور حدود ۰/۰۰۰٤ کسر جرمی است در زاویهٔ ۷۳۹ درجه می‌رسد و مقدار تجربی آن ۰/۰۰۰٤۳ که با ۷/۵ درصد خطا بین دادهٔ عددی و تجربی وجود دارد. با افزودن ۰,۳٪ نانو ذرات آلومینا به سوخت، میزان آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن تولیدی درون محفظهٔ احتراق به حدود ۰/۰۰۰۳ کسر جرمی در زاویه ۷۳۹ درجه می‌رسد که حدود ۲٤٪ کاهش می‌یابد. افزودن نانوذرّه هرچند دمای محفظهٔ احتراق را افزایش می‌دهد ولی با کاهش زمان تبخیر قطره زمان بیشتری برای تشکیل مخلوط سوخت و هوا داریم و درنهایت مخلوط یکنواخت‌تری خواهیم داشت که افزایش موضعی دما را که به علّت ناهمگنی سوخت اتفاق می‌افتد را کاهش می‌دهد.



شکل (۸): نمودار مقدار آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن

شکل (۹) میزان دودهٔ درون محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. دوده در طی احتراق در نواحی دارای سوخت غنی در داخل محفظهٔ احتراق تشکیل می‌شوند. افزودن نانوذرات آلومینابه سوخت تأثیر قابل توجّهی بر تشکیل آلایندهٔ دوده دارد. میزان آلایندهٔ ذرات جامد معلق تولیدی درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایهٔ کارکرد موتور حدود ۰/۰۰۰۲۳ کسر جرمی در زاویه ۸۰۰ درجه است و مقدار تجربی آن ۰/۰۰۰۲۱ که با ۸/۷ درصد خطا بین دادهٔ عددی و تجربی وجود دارد. با افزودن ۰,۵٪ نانو ذرات آلومینابه سوخت، میزان آلایندهٔ ذرات جامد معلق تولیدی درون محفظهٔ احتراق حدود ۰/۰۰۰۱ در زاویهٔ ۸۰۰ درجه می‌رسد که حدود ۳۷٪ کاهش می‌یابد.

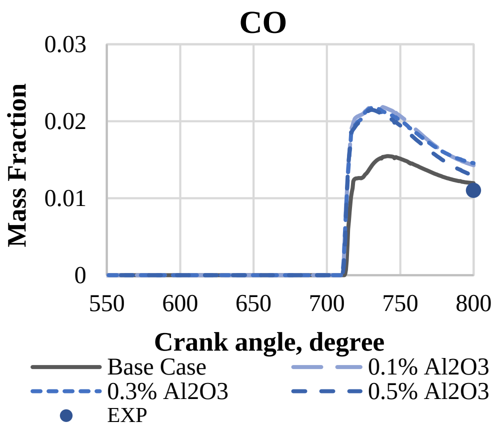


شکل (۹): نمودار میزان آلایندهٔ ذرات معلق جامد

با افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت، میزان شاخص همگنی افزایش می‌یابد و ازاین‌رو با افزایش کیفیت اختلاط سوخت و هوا، شاهد کاهش آلاینده‌ها هستیم.

شکل (۱۰) میزان مونوکسید کربن محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. مونواکسید کربن هنگامی ایجاد می‌شود که اکسیژن کافی برای واکنش کامل تمام کربن و تبدیل آن به CO_2 موجود نباشد و یا هنگامی‌که به دلیل زمان بسیار کوتاه چرخهٔ موتور، اختلاط ناقص هوا و سوخت رخ می‌دهد. نرخ واکنش تبدیل CO به CO_2 پایین است و این واکنش بسیار وابسته به دما است. پس از شروع احتراق، در جبههٔ شعله CO تشکیل می‌شود و شروع به انتشار در محفظهٔ احتراق می‌کند و از جبهه شعله فاصله می‌گیرد. در ناحیه‌های دور از جبههٔ شعله دمای کاهش پیدا می‌کند و ازاین‌رو نرخ انجام واکنش CO به CO_2 پایین می‌آید و مقداری از آلایندهٔ CO در محفظه باقی می‌ماند. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت تأثیر قابل توجّهی بر تشکیل آلایندهٔ مونواکسید کربن دارد. مونواکسید کربن تولیدی درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایه کارکرد موتور حدود ۰/۰۱۱۹۵۹ کسر جرمی در زاویهٔ ۸۰۰ درجه است و مقدار تجربی آن ۰/۰۱۱ که با ۷/٦ درصد خطا بین دادهٔ عددی و تجربی وجود دارد.

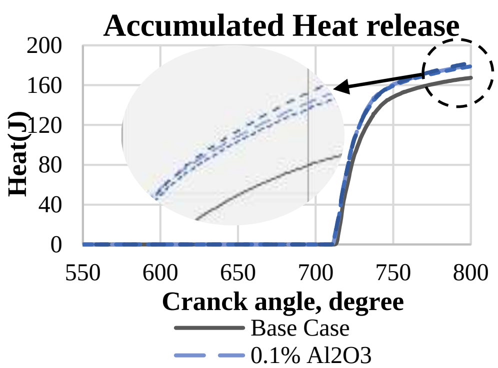
با افزودن نانو ذرات آلومینابه سوخت، میزان آلایندهٔ ذرات جامد معلق تولیدی درون محفظهٔ احتراق به ۰/۰۱٤٥ جز جرمی می‌رسد که حدود ۱۹٪ افزایش می‌یابد که تأثیر نامطلوبی محسوب می‌شود. علّت آن افزایش دما در جبههٔ شعله و کاهش گرادیان شدید دما است.



شکل (۱۰): نمودار میزان آلایندهٔ مونواکسید کربن

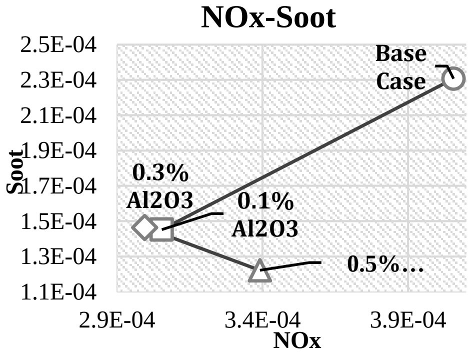
شکل (۱۱) میزان مجموع حرارت آزادشده محفظهٔ احتراق با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است.

میزان مجموع حرارت آزادشده درون محفظهٔ احتراق برای حالت پایهٔ کارکرد موتور حدود ۱٦۷/۳٦۹ ژول در زاویهٔ ۸۰۰ درجه است که با افزودن ۰,٥٪ نانو ذرات آلومینابه سوخت، میزان مجموع حرارت آزادشده درون محفظهٔ احتراق به حدود ۱۸۲/٤ در زاویهٔ ۸۰۰ درجه می‌رسد که حدود ۷٪ افزایش می‌یابد. این افزایش حرارت آزادشده سوخت به علّت تغییر ظرفیت حرارتی آن در اثر افزودن نانوذرّه است.



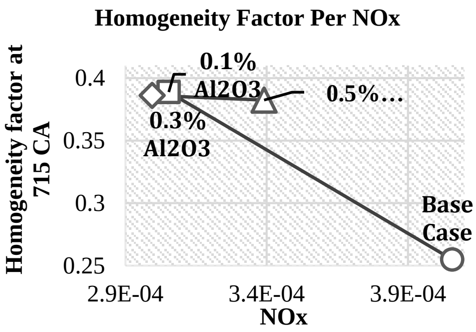
شکل (۱۱): نمودار میزان مجموع حرارت آزادشدهٔ درون محفظهٔ احتراق

شکل (۱۲) مقدار دودهٔ تولیدی در برابر ناکس با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. آنچه از شکل دریافت می‌شود این است که با افزودن نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم اثر قابل توجّهی روی تولید این دو آلاینده بر حسب یکدیگر دارد. این موضوع به معنی آن است که در حالت حضور نانو ذرات اکسید آلومینیوم، اختلاط مناسب‌تر سوخت و هوا جهت حصول مخلوط همگن حاصل می‌شود که این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه در آلاینده‌های تولیدی موتور می‌گردد. علّت آن را می‌توان در کاهش زمان تبخیر قطره و افزایش زمان تشکیل مخلوط جستجو کرد که ازیک‌طرف مخلوط یکنواخت‌تر، باعث می‌شود که دمای نقاطی که به علّت ناهمگنی مخلوط دما در آنها افزایش پیدا می‌کند کاهش یابد و از طرف دیگر تشکیل مخلوط بهتر باعث می‌شود تولید دوده به علّت کاهش هیدروکربن‌های نسوخته و ذرات کربن کاهش پیدا کند.



شکل (۱۲): نمودار میزان دوده بر حسب ناکس

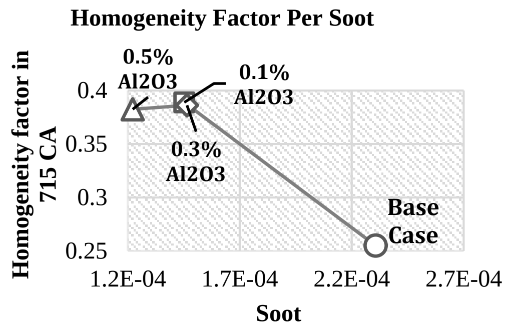
شکل (۱۳) مقدار ضریب همگنی در برابر ناکس در زاویهٔ ۷۱۵ درجه با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. با بررسی میزان شاخص همگنی می‌توان دریافت که میزان شاخص همگنی جریان برای حالات حاوی نانوذرات آلومینا بیشتر از حالت پایهٔ کارکرد موتور است که این موضوع به معنی آن است که در حالت حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم، اختلاط مناسب‌تر سوخت و هوا جهت حصول مخلوط همگن حاصل می‌شود که این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه در آلاینده‌های تولیدی موتور می‌گردد.



شکل (۱۳): نمودار میزان شاخص همگنی بر حسب ناکس

علّت آن افزایش ضریب هدایت حرارتی سوخت در مخلوط با نانوذرّه است که تبخیر قطرات سوخت را سرعت می‌بخشد و زمان بیشتری برای تشکیل مخلوط همگن وجود دارد.

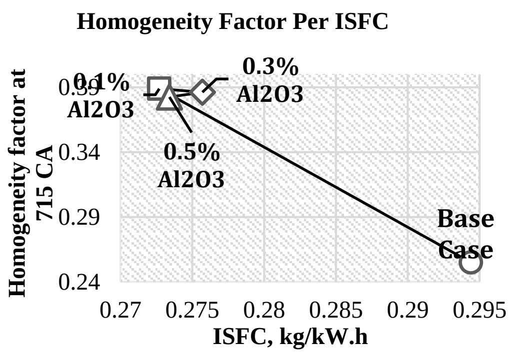
شکل (۱۴) مقدار ضریب همگنی در برابر دوده در زاویهٔ ۷۱۵ درجه با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. با بررسی می‌توان دریافت شد که میزان شاخص همگنی جریان برای حالات حاوی نانوذرات آلومینا بیشتر از حالت پایه کارکرد موتور است که این موضوع به معنی آن است که در حالت حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم، اختلاط مناسب‌تر سوخت و هوا جهت حصول مخلوط همگن حاصل می‌شود که این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه در آلاینده‌های تولیدی موتور می‌گردد.



شکل (١٤): نمودار میزان شاخص همگنی بر حسب میزان دوده

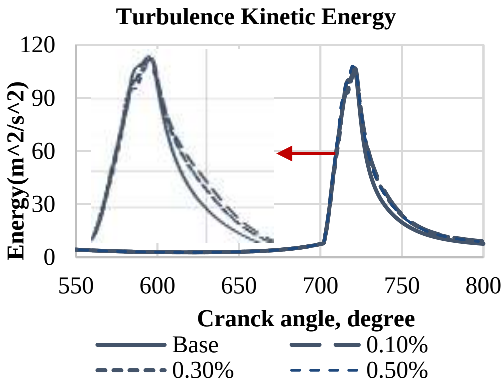
شکل (١٥) مقدار ضریب همگنی در برابر مصرف سوخت ویژه اندیکاتوری در زاویهٔ ٧١٥ درجه با در نظر گرفتن چهار درصد حجمی ٠، ٠/١، ٠/٣ و ٠/٥ برای نانوذرّهٔ اکسید آلومینیم در سوخت دیزل است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، افزودن نانوذرات آلومینا میزان مصرف سوخت ویژه را کاهش داده و همچنین شاخص همگنی درون محفظهٔ احتراق را افزایش داده است. دلیل آن اثر افزودن نانوذرّهٔ روی ضریب هدایت حرارتی سوخت است.

شکل (١٦) نشان‌دهندهٔ میزان انرژی جنبشی اغتشاش درون سیلندر است.



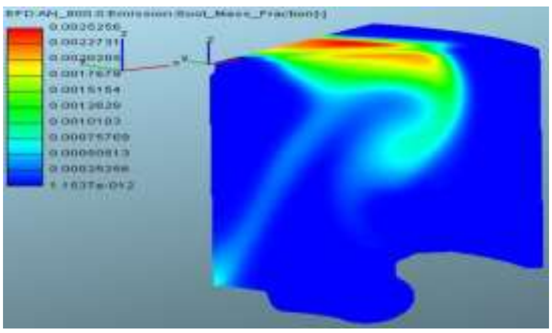
شکل (١٥): نمودار میزان شاخص همگنی بر حسب میزان مصرف سوخت ویژه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با آغاز پیش پاشش سوخت در ٦٦٩,٢٣ درجهٔ میل‌لنگ به درون محفظهٔ احتراق، میزان سرعت جریان افزایش می‌یابد و نمودار انرژی جنبشی اغتشاش شیب صعودی ملایمی پیدا می‌کند و پس از پایان پیش پاشش و آغاز پاشش اصلی در ٧٠١,٥٥ درجهٔ میل‌لنگ، میزان سرعت جریان درون محفظهٔ احتراق افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و نمودار شیب صعودی قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند و میزان انرژی جنبشی درون افزایش می‌یابد. پس از پایان دورهٔ پاشش اصلی، نمودار شیب نزولی پیدا می‌کند.



شکل (١٦): انرژی جنبشی توربولانسی

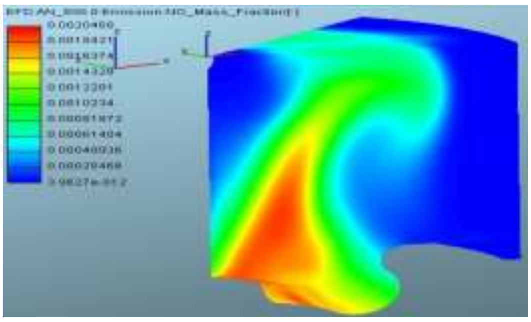
شکل شماره (١٧) نشان‌دهندهٔ میزان کسر جرمی آلایندهٔ دودهٔ تولیدشده درون محفظهٔ احتراق است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در ٧٦٠ درجهٔ میل‌لنگ، سیّال دارای بیشینه سطح تولیدی آلایندهٔ دوده در بین حالات بررسی شده است.



شکل (١٧): میزان کسر جرمی دوده در زاویهٔ ٨٠٠ درجه

شکل شماره (١٨) نشان‌دهندهٔ میزان کسر جرمی آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن تولیدشده درون محفظهٔ احتراق است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه

می‌شود، در ۷٦۰ درجهٔ میل‌لنگ، سیّال دارای بیشینهٔ سطح تولیدی آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن در بین حالات بررسی شده است.



شکل (۱۸): میزان کسر جرمی ناکس در زاویهٔ ۸۰۰ درجه

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی عددی تأثیر نانوذرات آلومینا بر عملکرد، مصرف سوخت، آلاینده‌های احتراق و همچنین کیفیت ترکیب سوخت و هوا با استفاده از نرم‌افزار AVL FIRE با کمک پارامتر اصلاح‌شده شاخص همگنی در یک موتور اشتعال تراکمی پاشش مستقیم بازخورانی شده پرداخته شده است. در این مطالعه بازهٔ زمانی شبیه‌سازی از زمان بسته شدن دریچهٔ ورودی هوا تا زمان باز شدن دریچهٔ خروجی گاز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بیان‌گر این است که فشار داخل سیلندر به دست آمده با نتایج تجربی از تطابق خوبی برخوردار است. در این مطالعه، چهار کسر حجمی نانوذرات آلومینا افزوده به سوخت بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، با افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت، میزان مصرف سوخت ویژه کاهش می‌یابد و همچنین میانگین آلاینده‌های خروجی موتور به‌جز آلایندهٔ مونواکسید کربن کاهش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، با افزودن نانو ذرات آلومینا به سوخت، میزان بیشینهٔ فشار و دمای داخل سیلندر به ترتیب ۵/۲ و ٦/۷ درصد و همچنین آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و دوده به ترتیب ۲٤ و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مقدار آلایندهٔ مونوکسید کربن ۱۹ درصد افزایش پیدا کرده است. درنهایت نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت، باعث افزایش ۵۲ درصدی شاخص همگنی می‌شود.

فهرست علائم

نسبت سوخت به هوای استوکومتری،-	AF
گرمای ویژه، J/kg.K	c
جرم سوخت، kg	m
فشار، Pa	p
شار حرارتی، W/m^2	$\dot{q}$
ثابت جهانی گازها، J/mol.K	R
دما، K	T
دمای محیط، K	T_∞
زمان، s	t
نقطه مرگ بالا، -	TDC
مولفه سرعت در جهت x، m/s	u
مولفه سرعت در جهت y، m/s	v
مولفه سرعت در جهت y، m/s	w

نمادهای یونانی

ضریب لزجت دینامیکی، Pa.s	μ
چگالی، J/kg.K	ρ
هدایت حرارتی، W/m	λ
مقیاس زمانی توربولانس، s	τ
نسبت تعادلی میانگین داخل سیلندر،-	φ

زیرنویس‌ها

فشار ثابت	p
شماره سلول	i
نانو سیال	nf
فاز جامد	s

مراجع

1. Heywood, J., "Internal combustion engine fundamentals ", McGraw-Hill, 1988.
2. Wang, H., Youngchul, R., Reitz, R. D., "Development of a reduced n-dodecane-PAH mechanism and its application for n-dodecane soot predictions", *Journal of Fuel,* Vol. 136, No. 1, pp. 25-36, (2014).
3. Pulkrabek, W. W., "Engineering fundamentals of the internal combustion engine", Second edition, Prentice-Hall, (1997).
4. Ballester, M. J, Norberto F., Dopazo, C., "Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions", *Journal of Fuel*, Vol. 75, Issue. 6, pp. 695-705, (1996).
5. Gunnerman, R. W., Russell. R. L., "Emission and efficiency benefits of emulsified fuels to internal combustion engines", SAE Technical Paper, No. 978474, (1997).
6. Walavalkar, A. Y., "Combustion of water-in-oil emulsions of diesel and fresh and weathered crude oils floating on water", PhD thesis in mechanical engineering, PennState University, (2001).
7. Mimani, T., and K. C. Patil., "Solution combustion synthesis of nanoscale oxides and their composites", *Journal Materials Physics and Mechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 134-137, (2001).
8. Kuo, K., Risha, G. A., Evans, B. J., Boyer, E., "Potential usage of energetic Nano-sized powders for combustion and rocket propulsion", Material Research Society Symposium, Published online by Cambridge University Press, (2003).
9. Ravi, P., Prajesh, B., and Phelan, P. E., "Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions", *Journal Physical review letters*, Vol.9, Issue. 2, (2005).
10. Prasher, R., Bhattacharya, P., and Phelan, P., "Brownian-motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of Nano fluids*", Journal of Heat transfer*, Vol. 128, pp. 588-595, (2006).
11. Prasher, R., Bhattacharya, P., and Phelan, P., "Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions", *Journal of Nano Letters*, Vol. 6, No. 7, pp. 1529-1534, (2006).
12. Jung, H., David, B. K, and Michael R. Z., "The influence of a cerium additive on ultrafine diesel particle emissions and kinetics of oxidation", *Journal* of *Combustion and Flame,* Vol. 142, No. 1, pp. 276-288, (2005).
13. Krishnamurthy, S., Bhattacharya, P., Phelan, R. S., Prasher, R. S., "Enhanced mass transport in Nano fluids", *Journal of Nano Letters,* Vol. 6, No. 3, pp. 419-423, (2006).
14. Prasher, R. S., and Phelan, P. E., "Modeling of radiative and optical behavior of Nano fluids based on multiple and dependent scattering theories", *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida, USA, (2005).
15. Tyagi, H., Phelan. P., Prasher, R., "Predicted efficiency of a Nan fluid-based direct absorption solar receiver", *Proceedings of the Energy Sustainability Conference*, California, USA, pp. 729-736 (2007).

16. Kao, M., Ting, C., Lin, B., Tsung, T., "Aqueous aluminum Nano fluid combustion in diesel fuel", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 36, No. 2, pp. 186-190, (2008).
17. Tyagi, H., "Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel", *Journal of Nano letters*, Vol. 8, Issue. 5, pp. 1410-1416, (2008).
18. Mench, M. M., Yeh, C. L. Kuo, K. K., "Propellant burning rate enhancement and thermal behavior of ultra-fine aluminum powders", *Proceedings of the 29th International Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, Germany, (1998).
19. Saeter, T. O., "Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions", *Proceeding of the hypothesis II symposium, Grimstad, Norway, (*1998).
20. Arul, V., Selvan, V., M, Anand, R., Udayakumar, M., “Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel–biodiesel–ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine", *Journal of Engineering and Applied Science*, Vol. 4, No. 7. pp. 1-6, (2009).
21. Sajith, V., Sobhan, C. B., and Peterson, G. P., "Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel", *Journal of Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2, pp. 581-407 (2010).
22. Mehregan, M., and Moghiman, M., "Effect of aluminum nanoparticles on combustion characteristics and pollutants emission of liquid fuels–A numerical study", *Journal of Fuel*, Vol. 119, pp. 57-61, (2014).
23. Zha, M., "Effect of particle size on reactivity and combustion characteristics of aluminum nanoparticles", *Journal of Combustion Science and Technology*, Vol. 187, pp. 1036-1043, (2015).
24. AVLFire Users Guide-ICE Physics & Chemistry, 2014.
25. Colin, O. and Benkenida, A., "The 3-zones extended coherent flame model for computing premixed/diffusion combustion", *Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 59, No. 6, pp. 593-609, (2004).
26. Hélie, J. and Trouvé, A., "A modified coherent flame model to describe turbulent flame propagation in mixtures with variable composition", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, Issue. 1, pp. 193-201, (2000).
27. Hanjalić, K., Popovac, M., and Hadžiabdić, M., "A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 1047-1051, (2004).
28. Arcoumanis, C., Gavaises, M., and French, B., "Effect of fuel injection processes on the structure of diesel sprays", SAE Technical Paper 1997-02-24, (1997).
29. Omidvarborna, H., Kumar, A., and Kim, D. S., "NOx emissions from low-temperature combustion of biodiesel made of various feeds tocks and blends", *Journal of Fuel Processing Technology*, Vol. 140, pp. 113-118, (2015).

30. Omidvarborna, H., Kumar, A., and Kim, D.-S., "Recent studies on soot modeling for diesel combustion", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 48, pp. 635-647, (2015).
31. Baumgarten, C., "Mixture formation in internal combustion engines", Springer, (2006).
32. O'Rourke, P. and Bracco, F., "Modeling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiments", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 9, pp. 101-106, (1980).
33. Nordin, P., "Complex chemistry modeling of diesel spray combustion", Chalmers University of Technology, (2001).
34. Nandha, K., Abraham, J., "Dependence of fuel-air mixing characteristics on injection timing in an early-injection diesel engine", SAE Technical Paper 2002-01-0944, (2002).
35. Peng, Z., Lian Tian, B., Lu, L., "Analysis of homogeneity factor for diesel PCCI combustion control", SAE Technical Paper 2011-01-1832, (2011).
36. Mobasheri, R. and Peng, Z., "CFD investigation into diesel fuel injection schemes with aid of Homogeneity Factor", *Journal of Computers & Fluids*, Vol. 77, pp. 12-23, (2013).
37. Mobasheri, R. Peng, Z., "The development and application of homogeneity factor on DI diesel engine combustion and emissions", SAE Technical Paper 2013-01-0880, (2013).
38. Suresh, S., "Synthesis of Al_2O_3–Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties", *Journal of Colloids and Surfaces Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 38, pp. 41-48, (2011).
39. Ghadimi, A., Saidur, R., Metselar, H. S. C., "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 4051-4068, (2011).

۴۱. حسینی، سید شرف الدین" نانوسیّال و مهندسی انتقال گرما" *انتشارات یزدا*، (۱۳۹۳)

42. Madhan, N. R., Gajendiran, M., Pitchandi, K., Nallusamy, N., "Investigation on aluminium oxide nano particles blended diesel fuel combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, Vol. 8, Issue. 3, pp. 246-257, (2016).

۴۳. عماد امینیان، آرش محمدی، تعیین ضریب انتقال حرارت درون محفظهٔ احتراق موتور دیزل سواری، یازدهمین همایش ملی موتورها ی درونسوز و نفت،تهران و ایران، (۱۳۹۸).

44. Nanthagopal, K., Susanth Kishna, R., Atabani, A. E., Al-Muhtasebc, A. H., Kumar, G., Ashok, B., "A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine", *Energy Conversion and Management*, Vol. 203 pp. 1-49, (2020).